

文章编号: 1000-4750(2021)04-0093-09

冷弯薄壁型钢受弯构件承载力与延性优化研究

邓 露^{1,2}, 钟玉婷¹, 杨远亮¹, 刘艳芝¹

(1. 湖南大学土木工程学院, 长沙 410082; 2. 湖南大学建筑安全与节能教育部重点实验室, 长沙 410082)

摘 要: 该文旨在通过改变冷弯型钢的截面尺寸来提高其承载力和延性。基于 ABAQUS 有限元软件建立已有试验模型, 计算了不同尺寸下的腹板翼缘加劲截面和腹板加劲的折叠翼缘截面的抗弯承载力及延性, 分析了上述 2 种截面的几何尺寸与抗弯承载力及延性的关系, 并采用人工神经网络 (ANNs) 和遗传算法 (GA) 对截面尺寸进行优化; 采用逼近理想解排序法 (TOPSIS) 分别确定了 2 种截面的最佳截面尺寸并提出截面尺寸的优化设计公式。结果表明: 对壁厚为 1.5 mm 的冷弯薄壁型钢构件, 在一定范围内增加截面腹板高度可以提高其抗弯承载力, 采用较小的平翼缘宽度可以提高其延性, 设置加劲肋的措施可以略微增加结构抗弯承载力但显著提高结构延性; 在所研究的截面中, 腹板加劲的折叠翼缘截面具有更好的力学性能。

关键词: 冷弯钢构件; 截面优化; 遗传算法; 神经网络; 承载力; 延性

中图分类号: TU392.1 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.05.0327

OPTIMIZATION ON BEARING CAPACITY AND DUCTILITY OF COLD-FORMED THIN-WALLED STEEL FLEXURAL MEMBER

DENG Lu^{1,2}, ZHONG Yu-ting¹, YANG Yuan-liang¹, LIU Yan-zhi¹

(1. College of Civil Engineering, Hu'nan University, Changsha 410082, China;

2. China Ministry of Education Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency, Hu'nan University, Changsha 410082, China)

Abstract: It aims to improve the bearing capacity and ductility of CFS members by changing the cross-sectional dimensions. An experimentally validated model generated in finite element code ABAQUS is utilized to study the flexural capacity and ductility of channel with web and flange stiffeners and configuration with web stiffener and folded flanges in different section dimensions. Then, the relationships between the section dimensions and optimization criteria (flexural capacity and ductility) are analyzed respectively, and geometrical dimensions of these sections are optimized using ANNs (artificial neural networks) and GA (genetic algorithm). The optimal section dimensions are obtained by TOPSIS (technique for ordering preferences by similarity to ideal solution) and the formulas for designing optimally section dimensions are presented. For the cold-formed thin-walled steel member with the thickness of 1.5 mm, it is demonstrated that: bearing capacity can be improved by increasing the web height in a certain range, and ductility can be improved by using smaller flat flange width, the measure of adding stiffeners can slightly increase the flexural capacity and significantly increase the ductility. Configuration with web stiffener and folded flanges has better mechanical properties among the studied cross sections.

Key words: cold-formed steel member; cross section optimization; genetic algorithm; neural network; bearing capacity; ductility

近年, 冷弯型钢构件已被广泛应用于建筑、机械和航空工程等多个领域。与热轧钢构件相

比, 冷弯型钢构件具有轻质高强、运输安装方便、节能环保、经济高效等优点。此外, 冷弯型

收稿日期: 2020-05-27; 修改日期: 2020-08-18

通讯作者: 刘艳芝 (1982—), 女, 湖南新化人, 副教授, 工学博士, 从事钢结构研究 (E-mail: liuyanzhi@hnu.edu.cn).

作者简介: 邓 露 (1984—), 男, 湖南双峰人, 教授, 工学博士, 土木学院院长, 从事结构工程研究 (E-mail: denglu@hnu.edu.cn);

钟玉婷 (1996—), 女, 安徽马鞍山人, 硕士生, 从事钢结构研究 (E-mail: 179732816@qq.com);

杨远亮 (1990—), 男, 湖南怀化人, 硕士生, 从事钢结构研究 (E-mail: 1138792628@qq.com).

钢截面形状在生产加工过程中,具有灵活性和多用性。这些截面形状是在室温下通过冷轧或压弯相对较薄的金属片获得的,生产工艺简单,具有极大的开发及优化的潜力。Krishnan 和 Shetty^[1]于 1959 年首次提出纯弯曲情况下进行开口工字型截面薄壁梁优化设计能明显节约材料成本。因此通过优化冷弯型钢截面形状,能够最大限度地提高材料利用效率以满足特定目标。

由冷弯型钢构造的最常见的结构体系是剪力墙体系,主要用于住宅建筑,使用截面尺寸小的超薄构件和半刚性连接是导致剪力墙体系局部过早失效和延性差的主要原因^[2]。所以对于冷弯型钢,有必要像热轧钢一样开发框架体系,不仅空间布置更灵活,与传统剪力墙体系相比也具有更好的承载力、抗震性能^[3]。传统的由单个构件形成的框架体系,其连接处具有较好的延性,而梁柱保持弹性,不能产生足够的延性以获得高抗震性,所以在高震区仅限于单层住宅^[4]。近年来,随着冷弯型钢框架体系从低层到多层的不断发展,这类结构对冷弯钢构件的承载力要求越来越高,与此同时,对构件延性的需求也在不断增大。

Wong 和 Chung^[5]提出了背靠背形式的双肢拼合 C 型钢并开展了一系列相关试验,结果发现该截面构件表现出不可忽略的延性和耗能,但其宽厚比并不满足高抗震区设计要求。Sabbagh 等^[6]发现双对称弯曲翼缘截面比双拼 C 型钢截面具有更好的强度、刚度和延性,然而考虑到制造和施工限制,这类截面不能广泛应用。Ye 等^[7]开发了一种折叠翼缘截面,承载力比双拼 C 型钢高出 57%,且有平翼缘,方便与楼板连接,比弯曲翼缘更实用。陈明等^[8]将冷弯 C 型钢拼合成 I 形、L 形、T 形或十字形等组合截面,提高了构件承载力,整体框架抗震性能更佳。随着计算机技术的发展,学者们通过引入遗传算法、粒子群算法等开展了更多截面优化的研究^[9-10]。

本文选用具有较好屈曲后性能的腹板翼缘加劲截面和腹板加劲的折叠翼缘截面,优化截面尺寸以提高其在单调荷载作用下的承载力及延性。在一定的优化约束条件下,采用已被验证的有限元模型对这两种截面进行几何、材料非线性分析,且考虑了初始缺陷的影响,再结合神经网络、遗传算法对截面尺寸进行优化,最后采用 TOPSIS 决策出最优截面尺寸。

1 有限元分析

于欣永等^[11]发现在卷边槽钢的受压翼缘中间设置加劲肋可以提高构件稳定性。Ye 等^[7]开发出的折叠翼缘截面,承载力比双拼 C 型钢高出 57%。但截面翼缘弯折使腹板和翼缘夹角增大,翼缘对腹板支撑减弱,可能导致腹板过早屈曲。因此本文在折叠翼缘截面的基础上设置腹板加劲肋,对图 1 所示的腹板翼缘加劲的槽钢截面及腹板加劲的折叠翼缘截面开展进一步的优化分析。

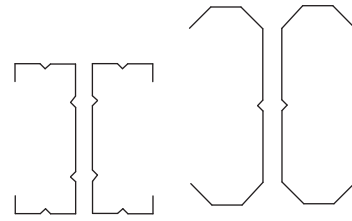


图 1 截面形状

Fig. 1 Cross-sectional shapes

1.1 有限元模型

Haidarali 等^[12-14]发现,当采用合适的单元类型、材料参数及缺陷引入方法,利用 ABAQUS 有限元分析模型就可以精准预测冷弯构件的承载力及屈曲后行为。本文使用已经过试验验证的有限元模型^[15],将 3 m 长的横向抗弯框架简化为 1.5 m 长的悬臂梁,边界条件、加载点和约束情况如图 2 所示。为了防止侧向扭转,对悬臂梁两端及中间截面的翼缘和卷边进行横向约束,用绑定约束连接两端及中间截面的腹板,端部施加 150 mm 的竖向位移(相当于 0.1 rad 转角)。构件采用 S8R5 单元模拟,单元尺寸为 20 mm×20 mm。构件选用 Q345B 钢种,其本构模型采用双线性应力-应变模型,弹性模量 E 取 200 GPa,第二模量 $E_s=E/100$,泊松比 $\nu=0.3$,屈服强度 $F_y=427$ MPa,极限强度 $F_u=593$ MPa。有限元模型中考虑了几何缺陷的影响,在一阶屈曲模态基础上引入初始缺陷大小,当壁厚 $t<3$ mm 时,依据 Schafer 和 Peköz^[16]的研究,局部及畸变几何缺陷大小分别为 $0.34t$ 和 $0.94t$ 。

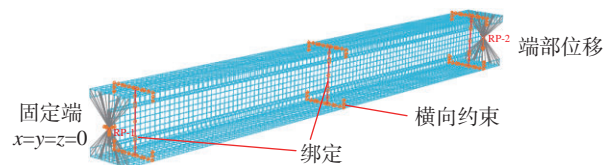


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

1.2 截面延性

欧洲规范依据受弯构件的承载力及变形能力将截面分为4类^[17]，I类、II类截面可以达到塑性弯矩，III类、IV类截面则无法达到。尽管冷弯薄壁型钢截面不能达到塑性弯矩，无法形成塑性铰，属于后两类截面，但陈以一等^[18]研究表明非塑性铰截面构件的塑性性能也是可以考虑利用的。本文将构件承载力和延性作为优化目标，依据 FEMA-356^[19]等效双线性模型 (EEEP) 计算延性，延性计算公式为：

$$\mu = \frac{\theta_t}{\theta_y} \quad (1)$$

式中： μ 为延性系数； θ_t 为目标转角，其取值是为真实弯矩-转角曲线上极限弯矩下降20%所对应的转角值^[20]； θ_y 为屈服转角，其取值为理想双线性模型上屈服弯矩对应的转角值，理想双线性模型弹性阶段的直线斜率由真实曲线上 $0.6M_y$ 的点确定。

2 优化约束条件

2.1 承载力和延性要求

冷弯型钢达到极限承载力后，具有承载力及刚度退化的特征，因此在对图1中截面进行优化时，综合考虑承载力-延性的条件：程欣^[21]综合实验及数值分析结果发现，非塑性铰截面的极限抗弯承载力并非都大于边缘屈服弯矩，且延性大多在2~3，故要求非塑性铰截面的承载力 M 能够超过边缘屈服弯矩 M_y ，达到极限后仍有一定的非线性变形能力且承载力不发生急剧退化，使框架内力重分布变成可能；并将延性 $\mu=3$ 作为延性类别的分界，认为 $\mu<3$ 的构件变形能力较差，不能用于抗震设计。当 $\mu>3$ 时，以保证构件在达到极限荷载后，可以继续抵抗一定的荷载。所以本文优化的承载力和延性要求分别见式(2)和式(3)：

$$M \geq M_y \quad (2)$$

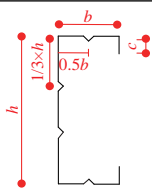
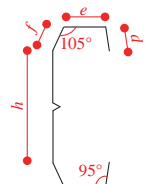
$$\mu \geq 3 \quad (3)$$

2.2 尺寸约束

本文旨在保证材料成本相当的情况下，即截面面积不变时，优化冷弯薄壁型钢的截面尺寸，最大限度地提高其承载力和延性。因此，规定表1所示的两种截面与图3所示的商业常用截面具有相同的材料和厚度，其厚度选取为1.5 mm，截面总长度为410 mm。需要注意的是，因为表1中各变量需满足截面总长度一定的限制条件，所以腹

板高度不作为独立设计变量。Ye等^[7]研究发现折叠翼缘截面内角为 105° ，外角为 95° 时结构承载力高，因此固定截面角度大小不变。其中，加劲都由两个夹角为 60° ，边长为10 mm的肋组成。

表1 所选截面、设计变量和约束
Table 1 Selected prototypes, design variables and constraints

序号	类型	截面形状	设计变量	约束
1	腹板翼缘加劲截面		$x_1=c$ $x_2=b$	$0.2 \leq c/b \leq 0.6$ $b/t \leq 60$ $ct \leq 50$ $100 \leq h \leq 350$ $b \geq 50$ $c \geq 15$
2	腹板加劲的折叠翼缘截面		$x_1=d$ $x_2=e$ $x_3=f$	$15 \leq d \leq 60$ $50 \leq e \leq 60$ $30 \leq f \leq 48$ $h \geq 100$ $h+2f \sin 105^\circ \leq 350$

注： c 为腹板翼缘加劲截面的卷边长度； b 为翼缘宽度； h 为腹板高度； t 为截面厚度，本文 t 取1.5 mm； d 为腹板加劲折叠翼缘截面的卷边长度； e 为平翼缘宽度； f 为折翼缘长度； h 为腹板高度。

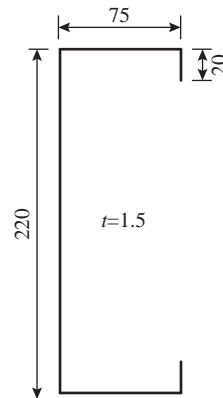


图3 商业常用截面尺寸 /mm
Fig. 3 Dimensions of commercial commonly used cross section

除了材料限制外，截面尺寸同时需满足欧洲规范 EN1993-1-3^[22]中尺寸限值及制造约束，并考虑实际使用情况^[7, 15, 23-24]。对于腹板翼缘加劲截面，根据 EN1993-1-3^[22]规范中的要求，需满足 $0.2 \leq c/b \leq 0.6$ ；为使楼板能和梁通过螺栓连接，平翼缘(截面1中“ b ”及截面2中“ e ”)最小宽度应为50 mm；因为过小的卷边无法轧制或压弯成型，所以卷边(截面1中“ c ”及截面2中“ d ”)最小长度为15 mm；为便于与其他构件连接，腹板 h 最小高度为100 mm；为控制楼板深度，截面深度最大为350 mm；为了给腹板留下足够高度，对于截面2，折翼缘需控制为 $f \leq 48$ mm。

3 优化框架

3.1 问题描述

鉴于成千上万次的有限元计算,有限元模型被进一步简化成单个槽钢^[15],单元类型、材料、约束、边界条件等都与1.1节一致。从承载力和延性的角度出发,利用人工神经网络和遗传算法对表1所示的两种截面形式进行优化,优化过程如图4所示,其中 M 是承载力, μ 是延性,优化目标是使承载力和延性最大化,定义如下:

$$\begin{cases} \text{Max}(M) \text{ 且 } \text{Max}(\mu) \\ x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}, i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (4)$$

式中: i 为正整数; x_i 为表1中独立的设计变量; x_i^{\min} 和 x_i^{\max} 分别为设计变量的最小值和最大值; N 为设计变量个数。

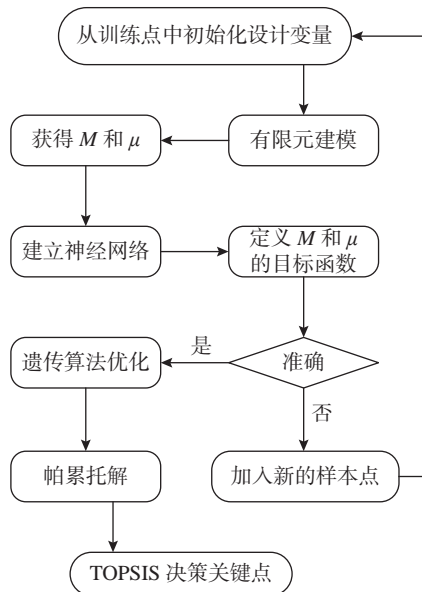


图4 优化流程图

Fig. 4 Flowchart of the optimization process

首先,从表1中给出的设计变量空间内任意选择样本点,ABAQUS依据这些尺寸建模,在后处理模块得到承载力 M 和延性 μ 。其次,构建输入(截面尺寸)和输出(承载力、延性)的神经网络,分别推导出承载力和延性的目标函数,如果这些函数响应是准确的,根据式(4),利用遗传算法最大化承载力和延性的目标函数以获得一系列帕累托解,再用TOPSIS决策出最优截面尺寸。否则,从表1给出的设计变量空间中选择新的样本点,重复以上步骤,直至找到正确的最优解。

3.2 神经网络

人工神经网络是对人脑或生物神经网络的抽

象和模拟,分为输入层、隐藏层、输出层3部分,每层神经元通过连接权重彼此联系。通过合适的训练步骤,人工神经网络就能以一定的精度合理预测输出值^[25-26]。本文使用BP算法,是目前应用最为广泛的神经网络模型之一。具体步骤如下:

首先,根据有限元建模结果准备数据。截面尺寸为输入数据, M 、 μ 为输出数据,为了给本研究中的优化问题提供输入输出数据,从表1中各截面尺寸的约束范围内均匀选择样本点。在各变量设计空间内,每隔2个单位取一个样本,采用全因子设计,ABAQUS依据这些样本尺寸建模,得出 M 和 μ 作为输出数据。为了防止过拟合,这些样本主要是用于训练、测试、验证3个部分,70%的样本用于网络训练,剩余30%用于测试,最后所有样本都用于验证网络精度。

其次,构建合适的神经网络。本文最终建立的神经网络共有3个隐藏层,隐藏层神经元个数依次是17、5、19,第1层隐藏层激活函数采用S型的对数函数,第2、3层则采用双曲正切函数,输出层使用线性函数,每种截面有 $2 \times X$ 个神经网络(承载力有 X 个,延性有 X 个), $X=17$ (第一个隐藏层神经元个数) $\times 5$ (第二个隐藏层神经元个数) $\times 19$ (第三个隐藏层神经元个数) $\times N$ (自变量个数)。

最后,使用均方误差来验证神经网络的准确度,均方误差的公式是:

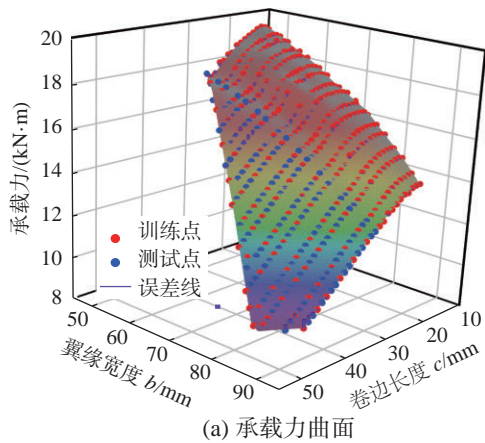
$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{X}_i - X_i)^2 \quad (5)$$

式中: n 为样本个数; \bar{X}_i 为神经网络预测输出结果; X_i 为有限元数值计算结果。

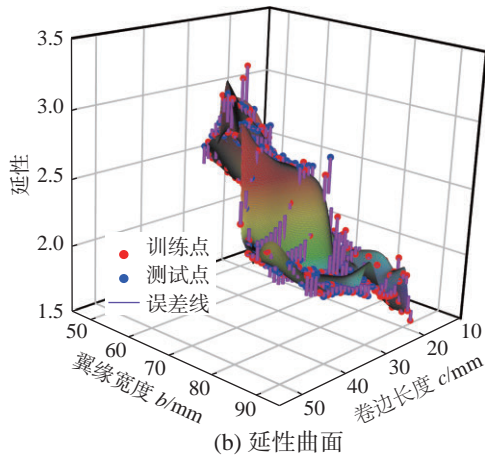
神经网络拟合腹板翼缘加劲截面的承载力和延性曲面如图5所示,红点代表被用于训练的样本,蓝点代表被用于测试的样本,紫色线段长度代表误差大小。对于腹板翼缘加劲截面,承载力、延性误差分别为0.21%、0.49%;对于腹板加劲折叠翼缘截面,承载力、延性误差分别为1.38%、1.97%,结果表明所构造的神经网络具有较高精度,可以用来预测冷弯薄壁型钢的承载力和延性。

3.3 遗传算法多目标优化

遗传算法是一类借鉴生物界进化规律(适者生存、优胜劣汰)演化而来的随机搜索算法,非常适



(a) 承载力曲面



(b) 延性曲面

图 5 神经网络拟合腹板翼缘加劲截面的承载力和延性曲面

Fig. 5 The bearing capacity and ductility surface of channel with web and flange stiffeners fitted by the neural network

用于处理复杂的非线性优化问题，易于并行化，鲁棒性高^[27-28]。该方法用适应度函数来评估个体，依据适应度值选择个体，再对被选择的个体进行交叉、变异操作，使种群中个体之间进行信息交换以得到新的个体，重复此类操作，种群不断进化，直至满足条件为止。遗传算法中各参数设置如表 2 所示。

表 2 遗传算法参数

Table 2 Parameters in genetic algorithm

参数	值
种群数量	100
帕累托比例	0.35
最大迭代次数	100
选择方式	锦标赛选择法
交叉系数	0.8
变异方法	自适应法

3.2 节已阐述通过建立神经网络寻找截面尺寸与承载力、延性的关系，用这种关系作遗传算法中的适应度函数，为式 (4) 中定义的优化问题生成

帕累托解 (如图 6)。对于帕累托解，在改进任意目标的同时，至少会削弱一个其他目标的解，就存在目标之间相互冲突和无法比较的现象，因此再用 TOPSIS 综合评价方法找出帕累托解中的最优解。

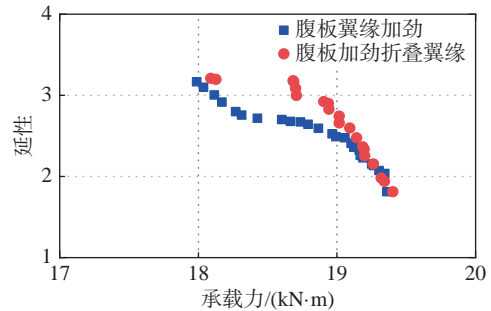


图 6 帕累托解

Fig. 6 Pareto frontiers

TOPSIS 是从多个解决方案中决策出最优方案的常用方法。基于归一化后的原始数据矩阵，给定每个目标的权重，构造规范化的加权决策矩阵，再分别定义每个目标的最优解与最劣解，决策问题的理想解即各目标最优解的合集，非理想解即最劣解合集，然后分别计算每个方案 (帕累托解) 与理想解和非理想解间的距离并排序，距理想解越近，而距非理想解越远，则越优。

4 寻优结果与讨论

4.1 寻优结果

图 5 已经给出了腹板翼缘加劲截面的承载力、延性随几何参数 c 和 b 的变化情况，如图 5(a) 所示，增大 c 或 b ， M 的值减小，由表 3 也可知，当承载力最大时，腹板翼缘加劲截面 c 和 b 分别取 EC3 规范规定的最小值 15 mm 和 50 mm，可以为腹板提供足够高度；同样，腹板加劲的折叠翼缘截面承载力最大时， d 和 e 也取最小值。因此，对于这两种截面，增加腹板高度可以提高承载力。很明显增加腹板高度，则增加了截面惯性矩，故截面承载力提高。

腹板翼缘加劲截面的延性随 c 和 b 变化情况如图 5(b) 所示。当翼缘宽度 b 较小时，延性出现峰值，随着翼缘宽度增加，延性大致减小；由表 3 可知，腹板加劲的折叠翼缘截面延性最大时，平翼缘宽度 e 也取较小值且折翼缘长度 f 取 EC3 要求的最大值 48 mm，增大 f 不仅可以加大截面深度，且控制了平翼缘宽度。因此，对于这两种截面，当平翼缘宽度 (腹板翼缘加劲截面中“ b ”及

表 3 承载力或延性最大值对应的截面尺寸

Table 3 Cross-sectional dimensions corresponding to the maximum bearing capacity or ductility

截面	目标	承载力 $M/(kN\cdot m)$	延性系数 μ	卷边 d/mm	平翼缘 e/mm	斜翼缘 f/mm	卷边 c/mm	翼缘 b/mm	腹板 h/mm
腹板翼缘加劲	M_{max}	19.36	1.81	—	—	—	15	50	240
	μ_{max}	17.99	3.17	—	—	—	25	55	210
腹板加劲折叠翼缘	M_{max}	21.43	1.72	15	50	39	—	—	192
	μ_{max}	18.09	3.21	23	54	48	—	—	150

腹板加劲折叠翼缘截面中“ e ”)较小时,可以延缓畸变屈曲的发生,延性较大。而平翼缘宽度并非取最小值 50 mm,是因为本文控制截面周长一定,若平翼缘取最小值,则腹板或卷边长度较大,易发生局部屈曲导致延性降低。

依据表 3 可知,当周长一定时,改变截面尺寸,冷弯薄壁型钢承载力没有太大变化,而延性变化较大,相比承载力,延性更为重要,因此根据各目标的重要性,本研究给定如下权重: $W_M=0.5$ 且 $W_\mu=0.5$, $W_M=0.4$ 且 $W_\mu=0.6$, $W_M=0.3$ 且 $W_\mu=0.7$,其中 W_M 是承载力的权重, W_μ 是延性的权重。不同权重下截面尺寸最优解见表 4,对于不同的权重,最优解是相同的,而且是表 3 中延性最大时的截面尺寸,足以见得延性的重要性。

为进一步考虑 ANNs-GA 模型的精度,用 ABAQUS 模拟了表 4 中最优截面的构件(见表 5)。对比表 4 和表 5,ABAQUS 计算得出的承载力、延性与 ANNs-GA 预测结果的平均误差在 1% 以下,表明本文使用的 ANNs-GA 模型能够较好的预测结构承载力及屈曲后行为。由表 5 可知,腹板

翼缘加劲截面、腹板加劲的折叠翼缘截面的承载力分别比商业常用截面高出 22.33%、23.01%,延性分别高出 213.73%、216.67%。可见对于 1.5 mm 的冷弯薄壁型钢,设置加劲肋是非常有效的措施,加劲肋能够有效地抑制截面失稳,导致峰值力矩略微增加,同时还能延迟和减轻屈曲导致的刚度退化,显著增大结构的延性。此外,优化后的截面具有较小的翼缘宽度,进一步延缓了畸变屈曲的发生,所以优化后截面的延性比商用截面高出 2 倍多。优化后的腹板加劲折叠翼缘截面的承载力和延性稍微大于腹板翼缘加劲截面,主要因为翼缘间相互支撑,弯曲刚度大,在折叠翼缘截面基础上,腹板加劲也有助于解决翼缘腹板夹角过大对腹板支撑减弱的问题。通过简单地优化截面尺寸,可以显著提升结构性能,且优化后腹板翼缘加劲截面屈服强度为 16.01 kN·m,承载力为 18.02 kN·m,延性为 3.2,腹板加劲的折叠翼缘截面屈服强度为 17.8 kN·m,承载力为 18.12 kN·m,延性为 3.23,两种最优截面满足 2.1 节中承载力大于屈服强度、延性大于 3 的条件。

表 4 神经网络-遗传算法模型预测结构在不同优化方案下的最优解

Table 4 Optimum solution of the structures predicted by ANNs-GA models for the different optimization scenarios

截面	权重 $[W_M W_\mu]$	承载力 $M/(kN\cdot m)$	延性系数 μ	卷边 d/mm	平翼缘 e/mm	斜翼缘 f/mm	卷边 c/mm	翼缘 b/mm	腹板 h/mm
腹板翼缘加劲	[0.5 0.5]	17.99	3.17	—	—	—	25	55	210
	[0.4 0.6]	17.99	3.17	—	—	—	25	55	210
	[0.3 0.7]	17.99	3.17	—	—	—	25	55	210
腹板加劲折叠翼缘	[0.5 0.5]	18.09	3.21	23	54	48	—	—	150
	[0.4 0.6]	18.09	3.21	23	54	48	—	—	150
	[0.3 0.7]	18.09	3.21	23	54	48	—	—	150

表 5 优化后截面与商用截面承载力、延性对比

Table 5 Comparison of bearing capacity and ductility between the optimized sections and the commercial section

截面类型	承载力 $M/(kN\cdot m)$	$\frac{M}{M_{(商业截面)}}$	延性系数 μ	$\frac{\mu}{\mu_{(商业截面)}}$
优化腹板翼缘加劲截面	18.02	1.22	3.20	3.14
优化腹板加劲折叠翼缘截面	18.12	1.23	3.23	3.17
商业标准截面	14.73	1.00	1.02	1.00

4.2 钢材强度等级对结构性能影响

在表 4 中两种最优截面的有限元模型基础上, 改变冷弯薄壁型钢强度等级, 分别采用 Q235、Q345 和 Q420 钢种, 钢材屈服强度和抗拉强度如表 6 所示, 其余参数与 1.1 节有限元模型一致。分析钢材强度等级对构件性能的影响, 结果如表 6 和图 7 所示。由表 6、图 7 可知, 增大钢材强度等级能够显著提高构件抗弯承载力, 对延性影响较小。对于腹板翼缘加劲截面的构件, 当钢材强度等级从 Q235 增大至 Q345、Q420 时, 其抗弯承载力分别增加 40.4% 和 68.1%; 对于腹板加劲的折叠翼缘截面, 当钢材强度等级从 Q235 增大至 Q345、

Q420 时, 抗弯承载力分别增加 38.5% 和 62.9%。故钢材强度等级对构件抗弯承载力影响较大。对于不同强度等级的钢材, 文中 4.1 节所提 2 种截面构件的抗弯承载力及延性随尺寸变化的趋势是相同的。

4.3 截面参数控制

研究发现承载力、延性好的构件其破坏模式为畸变屈曲和固定端附近局部屈服, 这说明控制构件的破坏模式基本上控制其承载力和延性的表现。为推广冷弯型钢的应用, 可以采用设置加劲肋的措施防止腹板局部失稳, 并通过控制截面尺寸防止翼缘失稳。同时, 我们发现腹板翼缘加劲截面和腹板加劲的折叠翼缘截面的抗弯承载力都大于边缘屈服弯矩, 满足式 (2) 要求。为了满足式 (3) 的要求, 在 3.2 节所述的样本中找出满足 $\mu=3$ 的截面尺寸临界值。若样本点不通过 $\mu=3$, 则采用插值法确定 $\mu=3$ 时的卷边、翼缘尺寸, 拟合出 $\mu=3$ 时翼缘、卷边相关关系表达式 R 、 Q 。结合表 1 中设计变量要求, 得出两种截面的优化设计式 (6) 和式 (7)。当截面尺寸满足式 (6) 和式 (7) 的要求时, 则 $\mu \geq 3$ 。

对于腹板翼缘加劲截面, 需满足:

$$\begin{cases} R = 4.62 + 0.88c \\ 50 \leq b \leq \min\{R, 60t\} \end{cases} \quad (6)$$

式中: R 为该截面翼缘宽度上限值。由 4.1 节寻优结果可知, 构件延性随着翼缘宽度增加而减小, 腹板翼缘加劲截面的翼缘取较小值时, 构件延性最大。因此翼缘宽度 b 需小于式 (6) 中临界值 R 。由 R 的计算公式可知, 翼缘宽度最大限值随卷边长度 c 增加而增大。根据优化结果, 对于 1.5 mm 厚的冷弯型钢, 建议该截面卷边长度 c 控制在 25 mm~43 mm, 随着冷弯型钢厚度增加, 卷边限值可适当放宽。

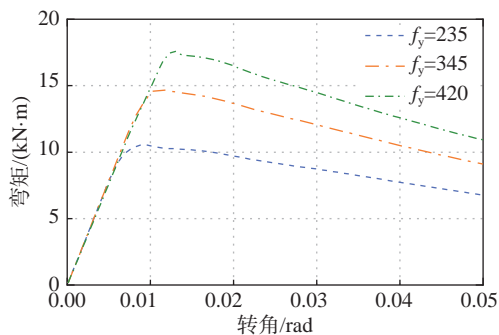
对于腹板加劲的折叠翼缘截面, 需满足:

$$\begin{cases} Q = 168.104 - 0.038e - 9.529d + 0.186d^2 \\ Q \leq f \leq 48 \end{cases} \quad (7)$$

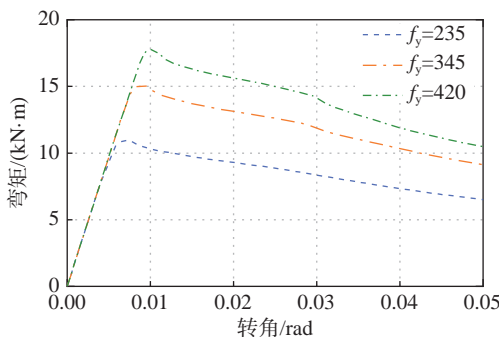
式中: Q 为该截面折翼缘长度下限值。由 4.1 节寻优结果可知, 构件延性随折翼缘长度增加而增大, 腹板加劲的折叠截面的折翼缘长度 f 取最大值 48 mm 时, 构件延性最大。因此折翼缘长度 f 需大于式 (7) 中临界值 Q 。由 Q 的计算式 (7) 可知, 折翼缘长度的最小限值随卷边长度 d 增加先

表 6 不同强度等级下有限元分析结果
Table 6 FE analysis results of members with different steel grade

截面类型	钢材等级	屈服强度 f_y /MPa	抗拉强度 f_u /MPa	承载力 M /(kN·m)	延性系数 μ
腹板翼缘加劲截面	Q235	235	305	10.58	3.01
	Q345	345	448	14.85	3.03
	Q420	420	545	17.79	3.15
腹板加劲的折叠翼缘截面	Q235	235	305	10.97	2.59
	Q345	345	448	15.19	3.15
	Q420	420	545	17.87	3.24



(a) 腹板翼缘加劲截面



(b) 腹板加劲折叠翼缘截面

图 7 不同钢材强度等级下构件弯矩-转角曲线对比
Fig. 7 Comparison of moment-rotation curves of members with different steel grade

减小后增大,受平翼缘宽度 e 影响较小。根据优化结果,对于 1.5 mm 厚的冷弯型钢,建议该截面卷边长度 d 控制在 23 mm~30 mm,随着冷弯型钢厚度增加,卷边限值可适当放宽;平翼缘宽度 e 满足表 1 要求,在 50 mm~60 mm。

5 结论

本文对腹板翼缘加劲截面及腹板加劲折叠翼缘截面的承载力、延性进行了研究,这些指标对于冷弯型钢的推广应用至关重要。利用非线性有限元 ABAQUS 建立了经试验验证的模型,获得了单向弯曲下的承载力、延性;利用人工神经网络和遗传算法,考虑三种不同的情况的权重: $W_M=0.5$ 且 $W_\mu=0.5$, $W_M=0.4$ 且 $W_\mu=0.6$, $W_M=0.3$ 且 $W_\mu=0.7$, 对这些截面尺寸进行优化,该方法预测误差小于 2%,可以准确预测冷弯型钢的承载力及屈曲后行为。主要得出以下结论:

(1) 提高钢材强度等级能显著增大构件的抗弯承载力,对延性影响不大。当截面面积和钢材强度等级不变时,同一类型不同尺寸的截面,其承载力差别不大,而延性却有较大差别,可见改变截面尺寸对提升延性性能至关重要。综合考虑承载力、延性条件,在上述不同权重下,最优截面均为延性最大时对应的截面尺寸。

(2) 对本文选定的腹板翼缘加劲截面和腹板加劲的折叠翼缘截面,增加腹板高度可提高承载力;采用较小的平翼缘宽度可以提高结构延性。此外,对于腹板加劲的折叠翼缘截面,延性最大时,折翼缘长度取最大值 48 mm。文中给出了满足所提出的承载力、延性条件下,两种截面尺寸的优化设计公式。

(3) 相同截面面积时,腹板加劲折叠翼缘截面的承载力、延性都优于腹板翼缘加劲截面,且前者优化后截面的承载力、延性比同等材料的商用截面分别高 23.01%、216.67%,是较为理想的截面形式。

(4) 对于厚度为 1.5 mm 的冷弯薄壁型钢,增加加劲肋既提高了极限承载力,又减轻了屈曲后刚度退化,可以大幅度提高延性,是非常有效的措施。

参考文献:

[1] Krishnan S, Shetty K V. On the optimum design of an I-

section beam [J]. Journal of Aero/Space Sciences, 1959, 26(9): 599 - 600.

- [2] Nithyadharan M, Kalyanaraman V. Behaviour of cold-formed steel shear wall panels under monotonic and reversed cyclic loading [J]. Thin-Walled Structures, 2012, 60(11): 12 - 23.
- [3] Lim J B P, Hancock G J, Clifton G C, et al. DSM for ultimate strength of bolted moment-connections between cold-formed steel channel members [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 117(2): 196 - 203.
- [4] Sato A, Uang R M. Seismic performance factors for cold-formed steel special bolted moment frames [J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 136(8): 961 - 967.
- [5] Wong M F, Chung K F. Structural behaviour of bolted moment connections in cold-formed steel beam-column sub-frames [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2002, 58(2): 253 - 274.
- [6] Sabbagh A B, Petkovski M, Pilakoutas K, et al. Development of cold-formed steel elements for earthquake resistant moment frame buildings [J]. Thin Walled Structures, 2012, 53(4): 99 - 108.
- [7] Ye J, Hajirasouliha I, Becque J, et al. Development of more efficient cold-formed steel channel sections in bending [J]. Thin-Walled Structures, 2016, 101(4): 1 - 13.
- [8] 陈明, 黄骥辉, 赵根田. 组合截面冷弯薄壁型钢结构研究进展[J]. 工程力学, 2016, 33(12): 1 - 11.
Chen Ming, Huang Jihui, Zhao Gentian. Research progress of compound section cold-formed thin-wall steel structures [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(12): 1 - 11. (in Chinese)
- [9] Ye J, Hajirasouliha I, Becque J, et al. Optimum design of cold-formed steel beams using particle swarm optimization method [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 122(7): 80 - 93.
- [10] Phan D, Mojtabaei S, Hajirasouliha I, et al. Design and optimization of cold-formed steel sections in bolted moment connections considering bimoment [J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146(8): 1 - 13.
- [11] 于欣永, 王春刚, 贾连光, 马平. 翼缘加劲的冷弯薄壁型钢受弯构件弹性屈曲应力研究[J]. 工程力学, 2013, 30(增刊 1): 68 - 71.
Yu Xinyong, Wang Chungang, Jia Lianguang, Ma Ping. Study on the elastic buckling stress of cold-formed steel flexural members with stiffeners in the flange [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(Suppl 1): 68 - 71. (in Chinese)
- [12] Haidarali M R, Nethercot D A. Finite element modelling of cold-formed steel beams under local buckling or

- combined local/distortional buckling [J]. *Thin Walled Structures*, 2011, 49(12): 1554 – 1562.
- [13] Pham C H, Hancock R J. Numerical simulation of high strength cold-formed purlins in combined bending and shear [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2010, 66(10): 1205 – 1217.
- [14] Ye J, Mojtabaei S M, Hajirasouliha I, et al. Strength and deflection behaviour of cold-formed steel back-to-back channels [J]. *Engineering Structures*, 2018, 177(12): 641 – 654.
- [15] Ye J, Becque J, Hajirasouliha I, et al. Development of optimum cold-formed steel sections for maximum energy dissipation in uniaxial bending [J]. *Engineering Structures*, 2018, 161(4): 55 – 67.
- [16] Schafer B W, Peköz T. Computational modeling of cold-formed steel: Characterizing geometric imperfections and residual stresses [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 1998, 47(3): 193 – 210.
- [17] EN 1993-1-1, General rules and rules for buildings[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [18] 陈以一, 吴香香, 程欣. 薄柔构件钢框架的承载性能特点研究[J]. *工程力学*, 2008(增刊 2): 62 – 70.
Chen Yiyi, Wu Xiangxiang, Cheng Xin. Capacity and deformability of steel frames composed of members with non-compact or slender elements [J]. *Engineering Mechanics*, 2008(Suppl 2): 62 – 70. (in Chinese)
- [19] FEMA 356, Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings [S]. Virginia: American Society Of Civil Engineers, 2000.
- [20] ANSI/AISC 341-16, Seismic provisions for structural steel buildings [S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2016.
- [21] 程欣. 非塑性铰H形截面钢构件分类准则与滞回特性[D]. 上海: 同济大学, 2013: 1 – 212.
Cheng Xin. Cross-section classification and hysteretic behavior of non-plastic-hinge H-section steel beam-columns [D]. Shanghai: Tongji University, 2013: 1 – 212. (in Chinese).
- [22] EN1993-1-3, General rules — Supplementary rules for cold formed members and sheeting [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [23] Parastesh H, Hajirasouliha I, Taji H, et al. Shape optimization of cold-formed steel beam-columns with practical and manufacturing constraints [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 155(4): 249 – 259.
- [24] Mojtabaei S M, Ye J, Hajirasouliha I. Development of optimum cold-formed steel beams for serviceability and ultimate limit states using big bang-big crunch optimisation [J]. *Engineering Structures*, 2019, 195(9): 172 – 181.
- [25] Dayhoff J E, Deleo J M. Artificial neural networks [J]. *Cancer*, 2001, 91(Suppl 8): 1615 – 1635.
- [26] 姜亚丽, 杨刚, 宋红红. 地震作用下矮塔斜拉桥的动力优化设计[J]. *工程力学*, 2020, 37(增刊 1): 313 – 319.
Jiang Yali, Yang Gang, Song Honghong. Dynamic optimization design of extradosed cable-stayed bridge under earthquake excitation [J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(Suppl 1): 313 – 319. (in Chinese)
- [27] Kok K Y, Lau H H, Phan T D, et al. Design optimisation for cold-formed steel residential roof truss using genetic algorithm [J]. *World Journal of Engineering*, 2018, 15(5): 575 – 583.
- [28] 颜欣桐, 徐龙河. 基于遗传算法的钢筋混凝土框架-剪力墙结构失效模式多目标优化[J]. *工程力学*, 2018, 35(4): 69 – 77.
Yan Xintong, Xu Longhe. Multi-objective optimization of genetic algorithm-based failure mode for reinforced concrete frame-shear wall structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(4): 69 – 77. (in Chinese)